



# Chapitre

## Aspects microscopique

### 6.1 Moment magnétiques atomiques

#### 6.1.1 Moment magnétique orbital

**π** Définition 1.1 : Moment magnétique d'un électron autour d'un noyau

Moment d'un électron autour d'un noyau :  $\vec{L} = \vec{r} \wedge (m_e \vec{v})$

Moment d'un courant circulaire :  $\vec{\mu} = iS\vec{n} = i\pi r^2 \vec{n}$

Le moment magnétique total :  $\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e} \vec{L} = \gamma_e \vec{L}$

**π** Définition 1.2 : Magnéton de Bohr

$\mu_{l,z} = \gamma_e L_z = -m_l \mu_B$  avec  $\mu_B$  le magnéton de Bohr.

#### 6.1.2 Moment magnétique de Spin

On ajoute le moment cinétique intrinsèque de l'électron : Spin S :  $S_z = m_s \hbar$

#### 6.1.3 Moment total

$\vec{j} = \vec{L} + \vec{S}$  et  $\|\vec{j}\|^2 = (j(j+1))\hbar^2$

## 6.2 Diamagnétisme

On étudie le phénomène d'induction à l'échelle microscopique en présence d'un champ magnétique appliqué :  $\vec{B}_a = B_a \vec{e}_z$

### Théorème 2.1

Orientation d'aimantation pour le diamagnétisme L'orientation de l'aimantation est opposée à celle de  $\vec{B}_a$ , conformément à la Loi de Lenz. Son effet est très faible

Le diamagnétisme est extrêmement faible :  $\chi_m \simeq 10^{-6}$

Dans ce cas,  $\vec{B}_{local} \simeq \vec{B}_a$

## 6.3 Paramagnétisme

Le paramagnétisme désigne le comportement d'un milieu matériel qui n'a pas d'aimantation spontanée, mais qui acquiert sous l'effet d'un champ magnétique extérieur  $\vec{B}_a$  une aimantation alignée dans le même sens que ce champ.

### Ordre de grandeur

La susceptibilité magnétique est positive et faible :  $\chi_m \simeq 10^{-3}$  à  $10^{-5}$ .

### Condition atomique

Pour observer du paramagnétisme, il faut que les atomes ou ions possèdent un moment cinétique total non nul ( $\vec{J} \neq \vec{0}$ ), ce qui implique la présence d'électrons célibataires (couches électroniques incomplètes).

## 6.3.1 Théorie de Brillouin

### Théorie

L'origine du paramagnétisme est quantique. Lorsqu'un atome possède un moment magnétique permanent  $\vec{\mu}$ , son interaction avec un champ magnétique extérieur  $\vec{B}_a$  est décrite par l'énergie potentielle dipolaire :

$$E_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_a$$

### Cas simple : un électron célibataire

#### $\pi$ Proposition 3.1

L'aimantation macroscopique  $\vec{M}$  d'un système de  $n_v$  moments indépendants par unité de volume s'exprime par :

$$\vec{M} = n_v \mu_B \tanh(X) \vec{e}_z$$

où  $\mu_B$  est le magnéton de Bohr,  $\vec{e}_z$  est la direction du champ appliqué  $\vec{B}_a$ , et  $X$  est le paramètre sans dimension :

$$X = \frac{\mu_B B_a}{k_B T}$$

### Gas général

#### $\pi$ Définition 3.1

Aimantation volumique :  $\vec{M} = n_v g \mu_B B_j(X) \vec{e}_z$

## 6.4 Ferromagnétisme

#### $\pi$ Définition 4.1

Cela résulte de l'interaction entre atomes du fait des spins des électrons des couches périphériques incomplètes associées à des sites voisins.

On peut avoir une aimantation même en l'absence de champ appliqué. On qualifie cette aimantation de spontanée.

## 6.4.1 Courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis

Pour les matériaux ferromagnétiques, la relation entre l'aimantation  $\vec{M}$  (ou l'induction  $\vec{B}$ ) et le champ excitateur  $\vec{H}$  n'est plus linéaire et dépend de l'histoire magnétique du matériau.

### $\pi$ Définition 4.2 : Courbe de première aimantation

C'est la courbe obtenue en augmentant progressivement le champ  $H$  à partir d'un état initial totalement désaimanté ( $H = 0, M = 0$ ). Elle présente une zone de forte croissance avant de stagner à la saturation  $M_{\text{sat}}$ .

Lorsqu'on fait osciller le champ  $H$  entre deux valeurs extrêmes  $-H_{\text{max}}$  et  $+H_{\text{max}}$ ,  $M$  ne suit pas le même chemin à l'aller et au retour : c'est le phénomène d'hystérésis.

### $!$ Caractéristiques du cycle

On définit deux grandeurs fondamentales sur un cycle d'hystérésis :

- L'aimantation rémanente  $M_r$  (ou  $B_r$ ) : L'aimantation subsistant lorsque le champ appliqué est annulé ( $H = 0$ ).
- Le champ coercitif  $H_c$  : Le champ inverse qu'il faut appliquer pour annuler l'aimantation ( $M = 0$ ).

## 6.4.2 Interprétation microscopique

### $\pi$ Définition 4.3

**Modèle du champ moléculaire de Weiss** : On modélise ces interactions quantiques complexes (interactions d'échange) en postulant que chaque moment magnétique subit, en plus du champ extérieur  $\vec{B}_a$ , un champ effectif proportionnel à l'aimantation du milieu, appelé champ moléculaire :

$$\vec{B}_{\text{eff}} = \vec{B}_a + \lambda \vec{M}$$

où  $\lambda$  est la constante de Weiss ( $\lambda > 0$ ).